

# 회전기기의 수명추정에 관한 연구

김기준  
인천전문대학교

## A Study on The Life Estimation of Rotation Machine

Kijoon Kim  
Incheon City College

### 요 약

인버터 구동 회전기기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 장기 신뢰성 평가 기법이 절실히 필요한 사항이기 때문에 본 연구에서 시험모델을 설정하고자 한다. 결과로는 종래는 비파괴 시험에 의한 off-line 진단법이 주로 시행되었지만, 최근에는 상태량을 계측하는 신종 센서의 개발이 진행되어 모니터링법에 의한 on-line 진단법이 점차로 증가하고 있다.

**Key Words** : 회전기기, 복합열화, 스트레스, 수명진단, 인버터

### 1. 서론

전력 전자 기술의 활성화로 인하여 회전기기의 운전 제어가 효율적으로 이루어짐에 따라 PWM 구동 방식의 인버터가 널리 보급되고 있다. 그러나 인버터 구동시 일반적인 60 Hz 정현파 교류 전원으로 구동되는 회전기기에서와는 다른 메카니즘으로 열화될 가능성이 있다. 즉, 60 Hz 구동의 회전기에서 예기치 못했던 문제들이 발생되고 이에 따라 사고가 유발될 수 있다.

PWM 인버터 구동은 회전기기 운전시 추가적인 고조파 발열 손실과 소음, 진동을 초래하며 더욱이 고속 스위칭에 의한 과도전압과 빠른 상승시간을 가진 반복 과도전압은 인버터와 회전기를 연결하는 케이블 공진 현상에 의해 배가되어 정현파 구동시에 예상할 수 없었던 매우 커다란 스트레스를 절연 시스템에 가하게 되어 회전기기의 성능 특성과 예상 수명에 심각한 영향을 미치고 있다.

따라서 인버터 구동 회전기기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 장기 신뢰성 평가 기법이 절실히 필요한 사항이기 때문에 본

연구에서 시험모델을 설정하고자 한다.

### 2. 회전기기의 복합 스트레스 열화

두 종류 이상의 스트레스로서 절연물의 성능이 저하되는 것을 복합요인 열화라고 하고 실제로 대부분의 열화과정은 복합요인 열화이다. 열적 스트레스 열화, 전기적 스트레스 열화, 기계적 스트레스 열화 및 환경적 스트레스 열화는 일단 단일 스트레스 열화로 생각된다. 여기서 열화는 복합 스트레스 열화 중에서도 비교적 연구가 진전되고 있는 것으로서 수트리 열화, 방사선·열열화, 전압·기계·열열화이다.

XLPE 케이블 절연체에 발생하는 수트리는 전압과 물의 2가지요인이 원인이 되는 열화과정이며 원자력 발전소용 케이블의 방사선·열열화 및 회전기 권선 절연의 전압·기계·열열화는 2~3가지요인이 원인이 되는 열화 과정이다. 수트리는 두 가지 요인이 갖추어지지 않으면 일어나지 않는 현상이지만 기타는 독립적이라도 열화한다.

#### (1) 수트리

폴리에틸렌을 수중에 침적해서 교류 전압을 장

시간 인가하면 폴리에틸렌층에 생긴 링은 직경길이( $\mu\text{m}$ )의 미소 보이드에 모여 그 안에 물이 들어가게 된다. 폴리에틸렌에 있어서 수트리의 발생상황은 나비벡타이 모양의 트리 이외에 내부 도체에서 발달한 것도 볼 수가 있다. 이와 같이 수트리는 전극과 고분자의 경계에 있어서 부정이나 고분자 내의 이물질, 보이드 등의 부정을 기점으로 해서 발생된다.

그 진전 기구로서 보이드나 크랙 중 물이 침입해서 국부 고전계를 발생하여 이것에 의해서 전기-열파괴, 물의 기화에 따르는 응력 파괴 혹은 반복된 정전응력에 의한 기계적인 파괴로 생긴다고 생각하고 있다. 수트리는 폴리에틸렌이외에도 실리콘수지, 에폭시 수지, 폴리프로필렌, 폴리염화비닐, 에틸렌 초산비닐 공중합체 등에서도 관측되고 있다.

(2) 방사선 · 열열화

원자력 발전소에 사용되는 전선 · 케이블은 통상의 조건 이외에 특수한 환경에 노출된다. 특히 방사선으로 인하여 재료의 내방사선성이 중요하게 된다. 그러나 내방사선성에 대해서 실제로는 방사선뿐만 아니라 동시에 열, 습기 또는 화학약품에 노출되는 복합요인으로서 열화가 발생된다. 방사선 열화의 기초 프로세스는 고분자에 방사선이 조사되며 래디칼이 발생하고 가교나 산화반응이 일어나게 된다. 따라서 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 폴리아미드, 천연고무, 실리콘수지 등은 가교, 폴리이소프틸렌, PMMA, PTFE, 셀룰로즈 등은 절단형이 된다.

(3) 전압 · 기계 · 열열화

고전압 회전기 권선 절연은 마이카를 주절연으로 하고 에폭시 수지 등을 함침 · 중합시킨 것이나 여기에 고전압, 기계력, 열 등의 스트레스가 동시에 걸리면 복합요인으로 열화가 일어난다. 각 열화요인에는 직접 상호 작용과 간접 상호 작용이 있고  $V \cdot t = C(\text{일정})$ 를 일반화한 Lift Capacity의 방법도 있다.

직접상호작용이란 영향요인이 동시에 작용한 경우에만 나타나는 상호작용으로서, 예를 들면 (전압+열) 복합요인열화로서 열열화가 실질적으로 일어나지 않는 온도와 시간의 범위에도 V-t 특성이 온도상승과 더불어 단수명 방향으로 평행 이동하

는 형상과 같이 하나의 요인(여기서는 온도)이 단독으로 열화를 촉진하지 않음에도 불구하고 다른 열화에 직접 영향을 미치는 것이다.

간접상호작용이란 영향요인이 동시에 작용한 경우에도, 축차적으로 작용한 경우에도 본질적으로 변화하지 않고 상호작용으로, 예를 들면(기계+열) 복합요인열화에 있어서 기계적 열화에 의한 절연내부로 층 박리가 일어나면 실효적인 열전도률의 저하에 의해서 국부온도는 상승하고, 더욱이 산소의 공급 속도도 증대해서 열열화가 촉진되는 현상과 같이 제 1의 열화요인이 제 2의 열화요인에 직접 작용하는 것이 아니고 제 1요인에 의해서 열화가 일어나 이것이 제 2요인 열화에 영향을 미치는 것과 같은 과정으로 대응하는 것이다.

3. 반사파 과전압에 의한 열화

파형제어에 의한 전력에너지의 고효율 이용을 실현하는 전력전자기술은 최근 급속히 발전을 이루어 가전에서 전력분야까지 널리 적용되고 있다. 이후 더욱 반도체 전력소자의 소형 고성능화와 이용기술의 개발이 진행되어 더욱 광범위하게 이용되리라는 것은 말할 필요도 없다. 그러나 그에 따라 고조파에 관계한 새로운 전자기적, 기계적 현상이 인식되고 그 개선을 위해 정력적으로 연구개발이 이루어져 오고 있다.

전기절연의 관점에서 인버터 전원에서 발생하는 반복 써지의 영향을 고려할 필요가 있다. 인버터는 정류된 직류전압을 고속으로 개폐하여 파형제어를 한다. 이 때 발생하는 개폐 써어지가 케이블, 전동기 등의 외부회로에 의해 반사 또는 공진을 일으켜 직류성분 이상의 과전압치를 가지는 경우가 있다.

인버터에서 발생한 써어지가 케이블을 경유하여 전동기 코일에 도달하면 그림 1에 나타낸 것과 같은 방형파에 고조파 써어지가 중첩된 파형으로 된다. 이와 같은 과전압, 급준 써어지가 전동기의 고정자 코일에 진입하면 절연시스템을 손상시킬 가능성이 있다. 이 써어지는 통상 「인버터 써어지」 또는, 「마이크로 써어지」라 불리고 있다. 「주기적 임펄스」 또는 「반복 임펄스」라 부르는 경우도 있다.

인버터 써어지는 운전중 교류 반주기마다 몇

개부터 수십 개 이상 발생하기 때문에 낙전시의 써어지나 진공차단기의 개폐 써어지 등과 비교하여 발생 임펄스의 수가 대단히 많다. 그 때문에 접속되어 있는 전동기 등의 기기 절연시스템에 어떠한 영향을 미치는가가 현안이다. 인버터의 초기의 과제였던 소음문제는 소자의 캐리어 주파수와 스위칭 속도의 고속화로 개선 가능하였지만, 이 때문에 전기적으로는 피크 전압치, 전압의 상승(dV/dt) 및 반복비율이 증가하는 경향이 있으며 절연시스템의 손상 가능성이 한층 심각해지고 있다.

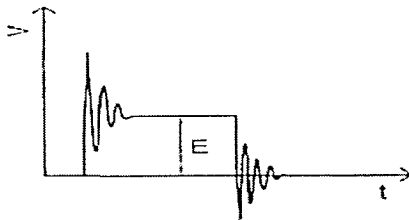


그림 1. 인버터 써어지 파형(모식도)

#### 4. 가속 시험 및 수명 진단

제품에 부착된 전기부품의 수명이나 고장율을 단기간에 평가하는 것은 매우 중요하다. 신뢰성 시험에서는 실제 사용조건에서 받는 스트레스를 모의한 시험을 실시하지만 통상 수명에 이르기까지 대단히 긴 시간이 걸린다. 특히 전력용 기기의 경우 수십년 이상을 요하기 때문에 실용적이지 못하다. 이 때문에 단기간에 수명 특성을 평가할 수 있는 가속 시험이 필요하다.

가속시험은 JIS Z 8115에서 “시험시간을 단축할 목적으로 기준조건보다 엄격한 조건에서 실시하는 시험. 비교 : 이 시험은 고장 모드 및 그 원인이 변하지 않는 것이 필요하다”로 정의되어 있다.

일반적으로 가속 수명 시험, 가속 열화 시험, 촉진 열화 시험 또는 촉진 수명 시험으로 구분된다. 가속시험은 본래 신뢰성 시험의 일부를 구성하는 것이다. 이제 가속시험은 단순히 수명예측이나 고장율 예측을 가능하게 하는 것뿐만 아니라 열화 과정을 비파괴적으로 추적하여 열화 메커니즘을 해명하는 것에 의해 실용시의 보수진단에 기여하

는 것도 가능하다.

열화기구가 단순한 경우는 가속시험이 비교적 용이하지만, 실제 전기 부품에서는 많은 스트레스가 복잡하게 연계되어 작용하기 때문에 수명이나 고장율의 예측이 어렵다. 이러한 경우 지배적인 열화인자가 무엇인가를 도출하여 그 지배적 열화인자에 주목한 보다 단순한 계로서 시험을 실시하는 것이 좋다. 또한 사용 실적이 있는 전기부품을 동시에 시험하여 결과를 비교하면 참고가 된다.

현재 전기부품의 가속시험으로서 공인된 방법은 없지만, 관계하는 기술자가 스스로 미리 시험법을 개발하고 있는 실정이다. 특히 역사가 짧거나 소량 로트 생산 기종의 전기부품에서는 이 경향이 강하다.

앞으로 새로운 가속시험법의 개발이 매우 중요하다고 생각되지만 무턱대고 스트레스나 빈도를 올리는 것은 안되며 고장발생의 기구를 해명하여 물리·화학적 법칙에 따른 합리적인 시험법을 개발하는 것이 요체이다.

정밀진단에서 수명진단은 설비, 장치 및 부품의 성능이나 형상을 계측하여 조사하고, 성능의 저하 정도나 열화의 정도, 이상 징후를 판단함과 동시에 결합의 위치, 장소 등을 판단하거나 또는 잔여수명을 추정하는 것이다.

그림 2는 수명진단의 원리를 나타낸 것으로, 전기, 전자 부품에 요구되는 기계적 강도, 전기적 강도, 내열성능 등의 기능량은 경년열화와 함께 점차로 저하해 간다. 한편, 이들 부품의 기계적, 전기적, 화학적인 특성을 나타내는 상태량은 일반적으로 경년열화와 함께 나빠진다.

전기, 전자 부품의 기능량이 여유한도 수준까지 저하하면 수명을 다하기 때문에 예방, 예지보전 활동을 통해 기능량이 이상 수준까지 저하한 시점에서 이상을 검출하고,부품의 교환 또는 수리를 실시하는 것에 의해 설비, 시스템에 고장을 일으키지 않도록 사용 가능한 상태를 유지하는 것이다.

전기, 전자 부품의 기능량은 예를 들면, 기계강도, 절연파괴전압 등의 물리량은 운전중인 설비, 기기, 시스템에서 직접 측정하는 것이 곤란한 경우가 많다. 따라서 기능량과 함수관계에 있는 상태량을 만들어서 이 상태량을 측정하는 것에 의해 기능량을 추정하는 방법이 사용되고 있다.

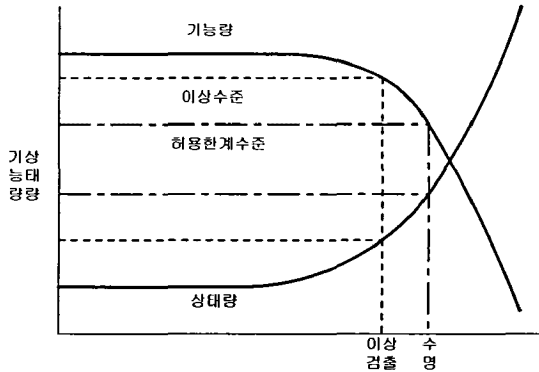
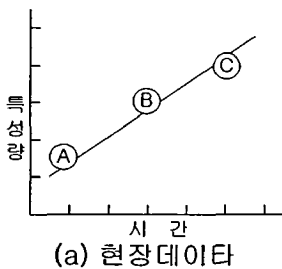


그림 2. 수명 진단의 원리

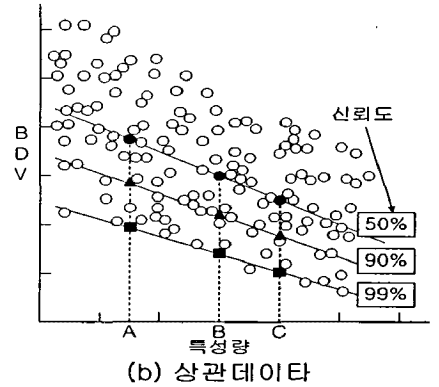
그림 3은 가교 폴리에틸렌 케이블의 잔여수명 추정절차를 예시한 것이다. 이 잔여수명 추정법은 현장에서 실측된 비파괴 절연특성치(상태량, 예를 들면  $\tan\delta$ 나 직류 누설전류)의 경년열화 특성 및 그 비파괴 절연특성치와 절연파괴전압(BDV) 특성(상태량)과의 관계를 이용하여 케이블의 잔여수명을 추정하는 것이다. 이 경우 케이블 선로의 중요도, 항장도 등에 따라 신뢰도가 설정되지만, 신뢰도를 높게하면 절연파괴전압은 과소평가되며 또한 잔여수명도 짧아지는 평가결과를 나타낸다.

그리고 기기나 부품의 수명진단방법의 분류를 표 1에 나타냈다. 수명진단에는 장치, 기기를 정지시켜 진단하는 off-line 진단법과 정지시키지 않고 운전상태에서 진단하는 on-line 진단법이 있다. Off-line 진단법에는 비파괴 시험법에 의한 방법과 파괴시험에 의한 방법이 있지만 일반적으로 비파괴 시험법이 이용된다.

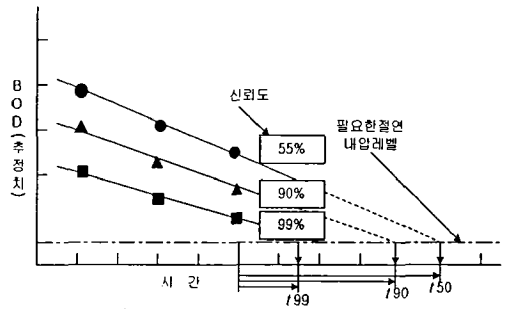
또한 On-line 진단법에는 전기, 전자 부품의 상태량을 연속적으로 감시하는 모니터링법과 정기적으로 진단하는 활선진단법이 있다.



(a) 현장데이터



(b) 상관데이터



(c) 특성량으로 추정된 BDV의 경년변화와 추정잔여수명

( $t_{50}$ ,  $t_{90}$ ,  $t_{99}$ 를 각기 신뢰도 50%, 90%, 99%라 할 때 최종 측정시의 추정잔여수명)

그림 3. 잔여수명 추정절차의 예시도

표 1. 수명진단법의 분류

수명 진단	On-line 진단	비파괴 시험	열화진단 이상진단 수명진단
			파괴시험
수명 진단	Off-line 진단		모니터링
			활선진단

### 5. 결론

종래는 비파괴 시험에 의한 off-line 진단법이 주로 시행되었지만, 최근에는 상태량을 계측하는 신종 센서의 개발이 진행되어 모니터링법에 의한 on-line 진단법이 점차로 증가하고 있다. 진단내용으로 분류하면 열화의 정도를 조사하는 열화진단, 이상 징후를 조사하는 이상진단 및 잔여수명을 추

정하는 수명진단으로 크게 나눌 수 있다. 이들 열화진단은 대상이 되는 설비, 기기 또는 부품의 중요도, 가격, 가동율, 기술적 난이도 등을 고려하여 가장 적당한 방법을 선택하여 실시한다.

### 참 고 문 헌

1. IEC Document 349-2
2. IEC Document 34-15
3. IEC Document 34-17
4. IEC Document 34-18-31
5. IEC Document 34-18-32
6. G.C.Stone, H.G.Sedding, B.A. Lloyd and B.K. Gupta. "The Ability of Diagnostic Tests to Estimate The Remaining Life of Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No.4, p.833-841, Dec. 1998
7. J.E. Timperley, J.R. Michalec. "Estimating the Remaining Service Life of Asphalt-Mica Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No.4, p.656-693 Dec. 1994
8. B.K. Gupta and I.M. Culbert. "Assessment of Insulation Condition in Rotating Stators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No.3, p.500-508 Sep. 1992